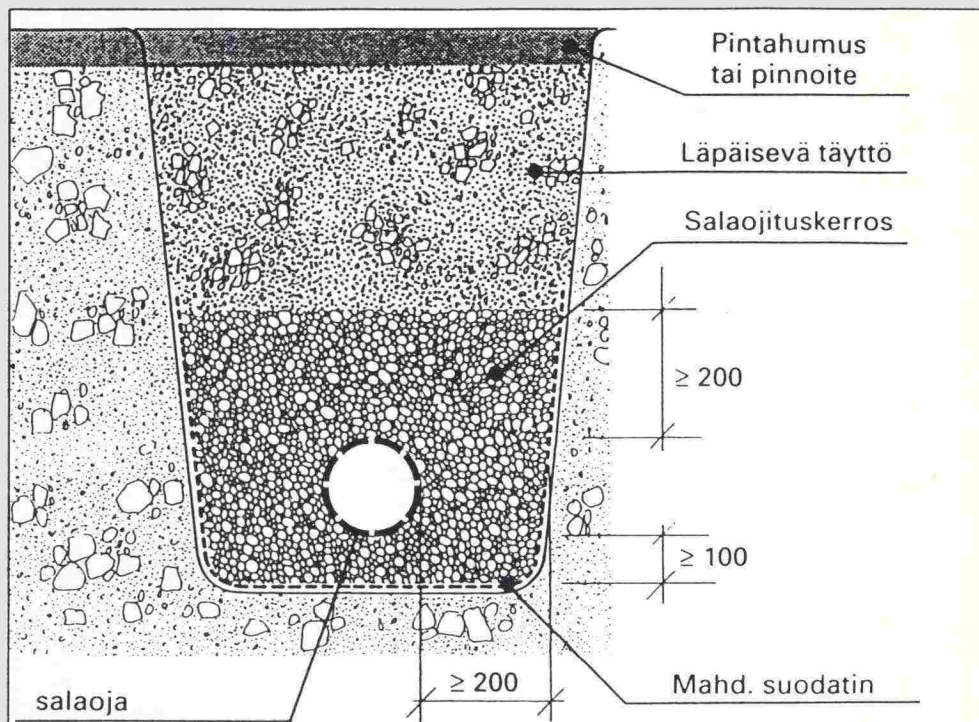


Rautasaostuman aiheuttama salaojan tukkeutuminen ja toimenpiteet tukkeutumisen estämiseksi



Tielaitoksen
selvityksiä

60/1992

Kuopio 1992

Kuopion
tuotantotekninen
kehitysyksikkö

Tielaitoksen selvityksiä
60/1992

**Rautasaostuman aiheuttama salaojan
tukkeutuminen ja toimenpiteet
tukkeutumisen estämiseksi**

282



Tielaitos
Uudenmaan tiepiiri

Tielaitos
Kuopion tuotantotekninen
kehitysyksikkö

Kuopio 1992

Kauko Kujala ja Jukka Palko, teksti
Hannu Autio, kuvat

ISBN 951-47-6629-6
ISSN 0788-3722
TIEL 3200110

OFFSETPAINO L. TUOVINEN KY
Kuopio 1992

Julkaisua saatavana:
Kuopion tuotantotekninen
kehitysyksikkö



kuopio
kuopio

Tielaitos
Tiehallitus
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte (90) 148 721

Kuopion tuotantotekninen
kehitysyksikkö
Kirkkokatu 1
PL 1117
70101 KUOPIO
Puh. (971) 199 760

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	TIERAKENTTEEN KUIVATUS	6
	2.1 Vesi tierakenteessa	6
	2.2 Kuivatusrakenteet	7
3	SALAOJAN TEKNINEN TOIMINTA	8
	3.1 Salaojarakenteet	8
	3.2 Veden virtaus salaojaan	9
	3.3 Veden virtaus salaojassa	10
	3.4 Ympärysaineet	11
4	RAUTASAOSTUMAT	13
	4.1 Rautasaostuman muodostuminen	13
	4.2 Okranmuodostuksen kemia	14
	4.3 Kemiallinen okranmuodostus	14
	4.4 Liukoinen rauta pohjavedessä, gravitaatiovedessä ja pintavedessä	18
	4.5 Mikrobiologinen okranmuodostus	18
	4.3.1 Tiobasillit	19
	4.3.2 Rihmamaiset rautabakteerit	20
	4.3.3 Organoionisten yhdisteiden mineralisoituminen	20
	4.6 Okranmuodostumisen riskialueet Suomessa	21
	4.7 Okran muodostumisherkkyiden määrittäminen	23
5	TOIMENPITEET OKRANMUODOSTUKSEN VÄHENTÄMISEKSI SALAOJAPUTKESSA	27
	5.1 Raudan hapettumisen ja saostumisen edistäminen maassa	27
	5.2.1 Neutraloivat kiviainekset ympärys- ympärysaineina	27
	5.1.2 Ojakaivannon kalkitus poltetulla kalkilla	27
	5.2 Saostuman estäminen ojassa	28
	5.2.1 Sora ympärysaineena	28
	5.2.2 Orgaaniset materiaalit ympärysaineina	29
	5.2.3 Vedenalainen salaojitus	29
	5.2.4 Putkimateriaalin valinta	29
	5.3 Toimenpiteet okran poistamiseksi salaojasta	30
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	31

KIRJALLISUUS

1 Johdanto

Toimivat kuivatusrakenteet ovat tien liikenneturvallisuuden ja rakenteellisen kestävyysedellytyksiä. Kosteustila vaikuttaa rakennemateriaalien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin sekä maapohjan routivuuteen. Tierakenteen syväkuivatus toteutetaan yleensä salaojituksella, jonka tärkeimpänä tehtävänä on koota rakennekerrokseen kertyvä vesi ja johtaa se pois tierakenteen ulkopuolelle. Tämän vuoksi salaojitus on mitoitettava virtaamien osalta oikein. Putkiston ja putken ympärysaineen on pystyttävä ottamaan virtaama vastaan. Salaojarakenteiden toimivuutta on pyritty parantamaan kehittämällä erilaisia putkirakenteita ja ottamalla käyttöön erilaisia ympärysaineita. Tierakenteen salaojitus toteutetaan yleensä muovisten salaojaputkien ja sorasta tehdyn ympärystäytön avulla. Etenkin Pohjanlahden rannikkoalueilla salaojituksen ongelmana on rautasaostuman aiheuttama salaojien tukkeutuminen. Rautasaostuma muodostuu sekä kemiallisen että mikrobiologisen toiminnan tuloksena. Tierakenteiden salaojituksessa raudan saostumisesta on pyritty estämään lähinnä vedenalaisen salaojituksen avulla sekä käyttämällä ympärysaineena soran asemasta sahajauhoa. Sahajauhon pitkäaikaiskäytön ongelmana on sen tiivistyminen ympärysrakenteessa.

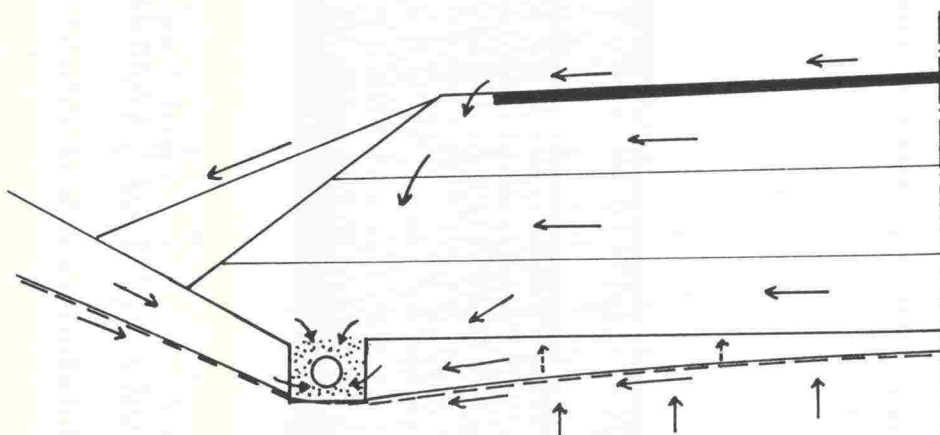
Tämän kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on etsiä tietoa raudan saostumisesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä sekä saostuman aiheuttamasta salaojaputken tukkeutumisesta. Lisäksi tutkimuksessa on tarkoitus etsiä tienrakentamiseen soveltuvia potentiaalisia menetelmiä rautasaostumariskin vähentämiseksi salaojaputkessa. Kirjallisuustutkimuksen perusteella laaditaan tutkimussuunnitelma erilaisten ympärysaineiden käyttökelpoisuuden tutkimiseksi käytännön tiekohteissa.

2 Tierakenteen kuivatus

2.1 Vesi tierakenteessa

Vesi vaikuttaa tierakenteen liikenteelliseen ja rakenteelliseen toimivuuteen. Vetenä tai lumena maanpinnalle tulevasta sadannasta osa virtaa tienpintaa tai läpäiseviä rakennekerroksia pitkin sivuojiin, osa imeytyy pohjamaahan ja osa haihtuu takaisin ilmaan (kuva 1). Tien kosteustila vaikuttaa tierakenteen kestävyys- ja käyttäytymiseen päällysteestä pohjamaahan saakka. Haittavaikutuksia aiheuttavat sekä sade- että sulamisvedet. Sadevesistä aiheutuu sekä liikenteellisiä haittoja että rakenteellisia syöpmisvaurioita. Sulamisvaiheessa liiallinen vesi aiheuttaa pääasiassa kantavuuden alentumista. Tällöin dynaamisen kuormituksen seurauksena huokosveden ylipaine kasvaa, jolloin maan sisäinen kitka pienenee ja leikkauslujuus alenee.

Kosteustilan haittavaikutuksia voidaan vaho- ja pohjavesien osalta pienentää kuivatuksen avulla. Kuivatuksen tavoitteena on poistaa liikenteelle tai tien rakenteelle haitallinen vesi tien pinnalta ja rakenteen sisältä sekä tien lähiympäristöstä. Tien kuivatusjärjestelyt voidaan ryhmitellä pintakuivatukseen, syväkuivatukseen, rumpuihin ja kuivatuksen erityisrakenteisiin. Pintakuivatus kohdistuu kaikkeen tiealueen pinnalla olevaan sekä myös mahdolliseen ulkopuolelta tulevaan sade- ja sulamisveteen. Syväkuivatus kohdistuu puolestaan tierakenteen sisällä olevaan haitalliseen veteen.



Kuva 1. Kaaviokuva veden esiintymisestä tierakenteessa.

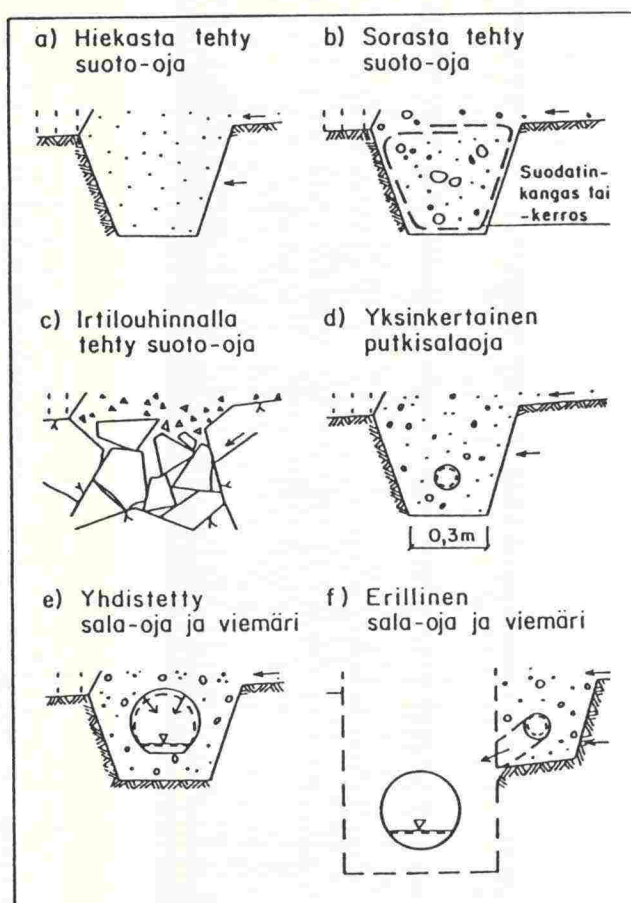
2.2 Kuivatusrakenteet

Tien kuivatus voidaan jakaa vertikaalisuunnassa pintakuivatukseen ja syväkuivatukseen. Pintakuivatuksen periaatteena on, että vesi johdetaan ajoradalta ja muilta pinnoilta riittäviä kaltevuuksia käyttäen avouomien tai putkien välityksellä luonnonvesistöihin. Pintakuivatusrakenteita ovat sivu-, lasku- ja niskaojat sekä erilaiset kourut, rummut ja sadevesiviemärit. Sivuojan tärkein tehtävä on estää vesien kertyminen lammikoiksi tien viereen. Pintakuivatusrakenteiden toimintaa ei käsitellä lähemmin tässä yhteydessä.

Syväkuivatuksella tarkoitetaan päällysrakenteen ja alusrakenteen kuivatusta. Syväkuivatus voidaan suorittaa joko suotosalaojituksen tai putkisalaojituksen avulla (kuva 2). Salaojien pääasiallisena tarkoituksena on maahan imeytyneen veden sekä pohjaveden kerääminen ja poisjohtaminen sekä tarvittaessa pohjaveden pinnan alentaminen. Pientareen ja luisien läpi sekä päällysteen halkeamista tien runkoon pääsevät vajovedet poistetaan kantavuusmitoituksen vaatimista rakennekerroksista. Kun routamitoitus vaatii paksumman rakenteen kuin kantavuusmitoitus, riittää yleensä että kantavuusmitoituksen vaatimat kerrokset kuivatetaan. Routamitoituksen vaatimat lisäkerrokset jätetään yleensä kuivattamatta.

Pohjaveteen on syväkuivatuksella puututtava mikäli pohjavettä virtaa tierakenteen alle tai pohjaveden pinta on liian lähellä tien tasausviivaa. Pohjaveden pinnan alentaminen kapillaarisen nousun ja routimisen vähentämiseksi ei ole yleensä kannattavaa. Kuivatussyvyydestä ja muista olosuhteista riippuu, hoidetaanko syväkuivatus avo-ojin vai suoto- tai salaojin. Sala- tai suoto-ojasta on oltava vettäläpäisevä yhteys kuivatettavaan kerrokseen. Pintavesien suora pääsy salaojaan estetään esim. vesitiiviin verhouksen avulla. Sorasta, kivistä tai sepelistä ja suodatinkankaasta (luokka II) tehtyä suoto-ojaa (kuva 2 b) voidaan käyttää alle 100 m matkoilla, kun pituuskaltevuus on vähintään 2 % ja johdettava vesimäärä on melko pieni. Hiekkaisella suoto-ojalla (kuva 2 a) voidaan johtaa vain erittäin pieniä vesimääriä (TVL 1985).

Putkisalaoja sopii useimpiin syväkuivatustilanteisiin, sen halkaisija on tavallisesti 100 mm. Suurempaa halkaisijaa tai kahta putkea tarvitaan runsaiden pohjavesivirtausten kohdalla. Putkisalaojan vähimmäiskaltevuus on 0.4 %, ilman erityistä syytä ei pitäisi käyttää alle 1 % kaltevuutta (TVL 1985). Vajovesiä keräävä salaoja voidaan sijoittaa suoraan suodatinkerrokseen tai maalaatikkoon ilman erillistä ympärystäytettä.



Kuva 2. Tierakenteessa käytettäviä erilaisia suoto- ja salaojia (TVL 1985).

3 Salaojan tekninen toiminta

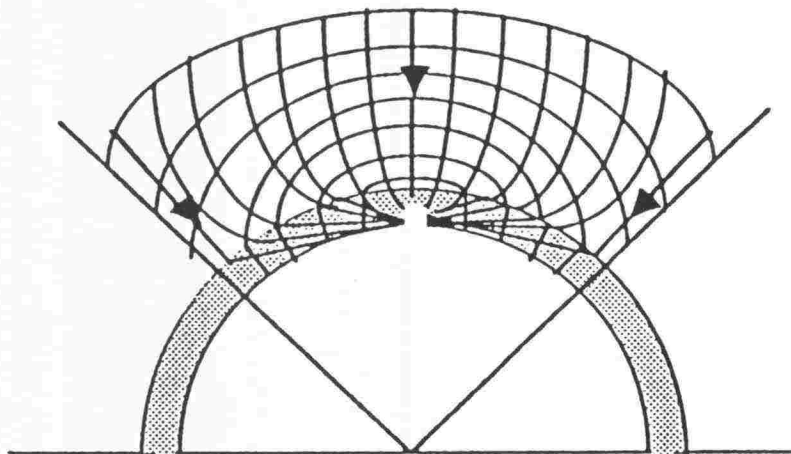
3.1 Salaojarakenteet

Salaojitukseen kuuluvia rakenteita ovat salaojaputki, salaojituskerros ja suodatinkerros. Salaojien tehtävänä on koota rakennekerrokseen kertyvä vesi ja johdtaa se ulkopuolelle purkupaikkaan. Jos salaoja tulee erilliseen kaivantoon, salaojan ympärillä tulee olla erillinen ympärystäytö, jonka avulla kootaan ja johdetaan kuivatettavat vedet salaojaputkeen. Salaojituskerroksen ympärillä olevan suodatinkerroksen tehtävänä on estää pohjamaasta irtoavien maahiukkasten kulkeutuminen salaojituskerrokseen ja huuhtoutuminen salaojaan, jossa se aiheuttaisi lietetukoksia.

Salaojaputkillla tulee olla riittävä vedenotto- ja johtokyky sekä tilanteen vaatima mekaaninen ja kemiallinen kestävyys. Salaojaputkimateriaaleja ovat PVC- ja polyeteenimuovi sekä tiili ja betoni. Salaojaputkien materiaaliikohtaiset laatuvaatimukset on esitetty yksityiskohtaisesti julkaisussa RIL 1987.

3.2 Veden virtaus salaojaan

Mikäli vesi pääsee virtaamaan säteettäisesti ja symmetrisesti salaojaputkeen joka suunnalta, voidaan putkea pitää ideaaliputkena. Homogeenisessa hyvin vettä johtavassa maassa vesi virtaa säteettäisesti salaojaputkeen. Käytännössä salaojaputket eivät toimi ideaaliputken tavoin vaan vesi pääsee putkiin ainoastaan määrättyistä kohdista, jolloin virtausviivat taipuvat voimakkaasti sisäänmenokohtiin. Salaojaputken kykyyn ottaa vastaan vettä vaikuttaa voimakkaimmin salaojan ympärysaine. Ympärysaineen tulisi estää liettyvien ainesten kulkeutumista putkiin sekä edistää veden kulkua sisään-tuloaukkojen kohdalle. Ympärysaineen ansiosta virtausviivat taivuttuvat loivemmin sisääntuloaukkojen suuntaan ja sisääntulovastus pienenee (kuva 3).



Kuva 3. Ympärysaineen vaikutus veden virtausviivoihin (Saavalainen 1983)

Salaojaputken ympärysaineen vedenjohtavuuden tulee olla huomattavasti ympäröivän maan vedenjohtavuutta suurempi, jotta salaojaputkeen sisään virtaavalla vedellä olisi mahdollisimman pieni sisääntulovastus. Ympärysaineen vedenjohtavuuden tulisi olla vähintään 10...20 -kertainen ympäröivään maahan verrattuna. Hyvin vettäjohtava ympärysaine vähentää virtausvastusta. Sen suuruus riippuu vedenjohtavuuden ohella myös ympärysaineen paksuudesta.

Virtausviivojen taipumisesta sisääntuloaukkoja kohden aiheutuu lisävastusta, jota kutsutaan sisääntulovastukseksi. Sen suuruus riippuu maan vedenjohtavuudesta ja sisääntulovakiosta, jonka suuruus määräytyy puolestaan putken ulkohalkaisijan, sisäänvirtausaukkojen geometrinen ominaisuuksien ja

suhteellisen reikäpituuden perusteella (Saavalainen 1983). Salaojaputkien laatuvaatimuksissa (RIL 1987) on salaojille esitetty vedenottokyvyn vähimmäisvaatimukset.

Ympärysaineen tulee pienentää putken ulkopuolista virtausnopeutta siinä määrin, että putken liettymistä aiheuttavat partikkelit eivät lähde virtauksen mukana liikkeelle. Tästä syystä pohjamaan ja salaojituskerroksen väliin joudutaan laittamaan suodatinkerros. Suodattimen tarpeellisuus riippuu pohjamaan ja toisaalta salaojituskerroksen rakeisuudesta. Pohjamaan ollessa savea, hienoa silttiä tai savimoreenia ei eroosiota haitallisessa määrin tapahdu. Karkeammat silttimaat, hiekat ja moreenit ovat eroosioherkkiä ja suodatin on näissä yleensä tarpeen (RIL 126). Suodattimen vaikutus perustuu osaksi siihen, että vesi nousee kapillaarisesti ympärysaineessa. Veden virratessa maasta ympärysaineeseen ja edelleen sen kyllästyneeseen osaan veden nopeus koko ajan hidastuu. Tällöin yhä pienemmät maahiukkaset voivat laskeutua jo ennen putkea, jolloin ympärysaine täyttää tehtävänsä. Hydraulisesti toimivan suodattimen huokosten tulee siten olla riittävän pieniä, jotta kyllästynyt vyöhyke olisi suuri ja hiukkasilla olisi mahdollisuus laskeutua suodattimessa. Toisaalta huokosten tulisi olla niin suuria, ettei veden liikkuminen esty haitallisesti.

3.3 Veden virtaus salaojassa

Veden virratessa putkessa syntyy kitkan ja erilaisten putkessa esiintyvien esteiden ja epätasaisuuksien johdosta energiahäviöitä. Vedenjohtokyky on riippuvainen putken sisäpinnan sileydestä ja suoruudesta veden virtaussuunnassa. Esimerkiksi liitostavan ja valmistustoleranssien aiheuttamat "kynnykset" ja muovisilla aaltoputkilla pinnan aaltomaisuus virtaus-suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttavat vedenjohtokykyyn. Salaojaputkikoko määritetään nimelliskoon DN avulla, joka kuvaa salaojaputken vedenjohtokykyä. Kaikkien samaa nimelliskokoa olevien salaojaputkien tulee täyttää sama nimelliskoon mukainen vedenjohtokyky. Materiaalikohtaisissa vaatimuksissa määritetään putken sisähalkaisija sisäpinnan muodon, muodon pysyvyyden, karheuden sekä asennus- ja liitostavan perusteella. Putkien tulee säilyttää vedenjohtokykynsä nimellismittaan edellyttämänä vähintään 50 vuoden ajan. Putkissa ei saa olla virtausta pienentäviä eikä lietettä kerääviä esteitä.

Salaojien mitoitus suoritetaan yleensä mitoitusvirtaaman ja putken kaltevuuden perusteella mitoitus-

nomogrammien avulla. Nomogrammista saadaan putken nimellisläpimitta ja veden virtausnopeus. Salaojaputkien nimelliskoon tulee kuitenkin täyttää hoito- ja huoltonäkökohtien perusteella määräytyvät minimiarvot. Tienkuivatuksessa yleisimmin käytettävä salaojaputken koko on 100 mm (TVL 1991).

3.4 Ympärysaineet

Salaojituksessa käytetään ympärysaineita salaojitus- ja suodatinkerroksessa. Ympärysaineiden tehtävänä on estää veden mukana kulkeutuvan maa-aineksen pääsy salaojaputkeen, edistää veden pääsyä putken ympäristöstä putkeen sekä suojata putkea työn aikaiselta liettyimiseltä.

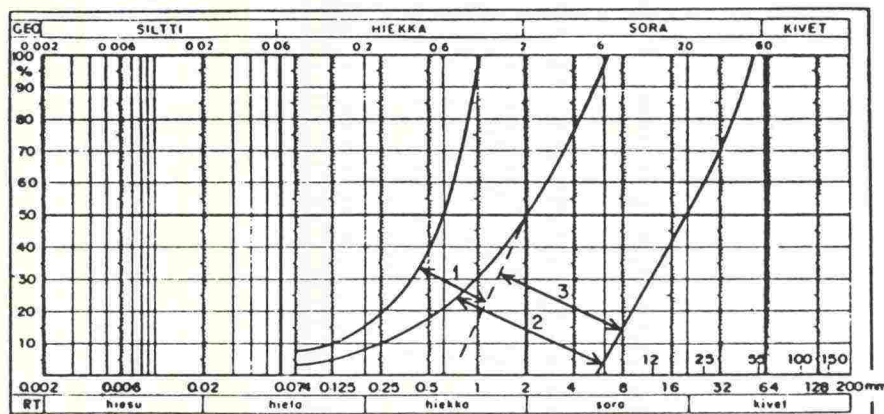
Ympärysainemateriaalit voidaan jaotella mm. materiaalin alkuperän ja toimintaperiaatteen perusteella. Materiaalin alkuperän perusteella ympärysaineet voidaan jakaa seuraavasti:

- rakeiset tai karkearakeiset materiaalit
- orgaaniset materiaalit (sahajauho, kuitu, turve)
- synteettiset materiaalit (lasikuitu-, polypropeen-, polyeteenikankaat)

Ympärysaineet voidaan jakaa myös massiivisiin ympärysaineisiin ja esipäällysteisiin. Massiiviset ympärysaineet ovat joko rakeisia materiaaleja tai orgaanisia aineita. Esipäällysteet voivat olla joko orgaanisista tai synteettisistä materiaaleista valmistettuja salaojaputkien päällysteitä. Synteettisistä materiaaleista valmistetut esipäällysteet ovat yleensä ohuita kuitu- tai mattomaisia kankaita, paksut esipäällysteet (> 10 mm) ovat yleensä orgaanisesta materiaalista valmistettuja päällysteitä.

Yleisin salaojituksessa käytettävä ympärysaine on sora. Kuvassa 4 on esitetty rakeisuuden ohjealueet, jonka mukainen ympärysaineen tulisi olla silloin kun salaoja tulee erilliseen kaivantoon. Alueen 1 (kuva 4) mukaista hiekkaa voidaan käyttää pelkästään vajovesiä kerääviin salaojiin. Alueiden 2 ja 3 mukaisia materiaaleja voidaan käyttää myös pohjavesiä kerääviin salaojiin (TVL 1991). Pohjamaasta tai hienorakeisista täytemaakerroksista irtoavien materiaalien pääsyn estämiseksi salaojakerrokseen käytetään suojakerroksen ympärillä suodatinkerrosta. Suodatin voidaan tehdä joko hiekasta tai yleisimmin suodatinkankaasta. Alueiden 2 ja 3 (kuva 4) soran ja routivan ohjamaan väliin on yleensä laitettava suodatinkangas tai 100 mm paksuinen suodatinkerros. Alueen 1 hiekkaa käytettäessä suodatinta tarvitaan yleensä vain silteissä ja häiriintyneessä savessa

tai silttimoreenissa.



Kuva 4. Tierakenteessa käytettävän salaojasoran rakeisuusvaatimukset (TVL 1985).

Sora joudutaan korvaamaan muilla ympärysaineilla joko taloudellisten tai teknisten syiden vuoksi. Soran heikko saatavuus voi useissa maissa olla pääasiallinen syy muiden ympärysaineiden käytölle. Suomessa sora joudutaan harvoin hylkäämään taloudellisin perustein. Pääasiallinen syy muiden soraa korvaavien materiaalien käytölle Suomessa on okrasaostumien muodostuminen. Okran muodostumisen estämiseksi ympärysaineena on käytetty yleisesti sahajauhoa tai salaajitus on suoritettu vedenalaisena. Sahajauhon käytön suurimpana ongelmana on lahoamisen seurauksena tapahtuva vedenjohtokyvyn alentuminen. Sen lahoaminen riippuu mm. maalajista ja lämpötilasta. Puoliintumisajan on arvioitu olevan noin 20 vuotta (Hove 1982). Sahajauhon tulee olla karkeata, tuoreesta havupuusta sahattua eikä siinä saa olla merkittävästi kuorta (Saavalainen 1991). Saavalainen esittää myös kookoskuidulla ja sahanpurulla esipäällystettyjen salaojaputkien käyttöaluerajoituksena maalajit, jotka rakeisuudeltaan vastaavat lähinnä silttejä.

Rakeinen kiviaines on yleisimmin käytössä silloin kun sen hinta on kohtuullinen. Peltosalaojituksessa ympärysaineena käytettävät materiaalit vaihtelevat pohjoismaissa. Suomessa sora on eniten käytetty ympärysaine (taulukko 1). Ruotsissa yleisin ympärysaine on myös sora, mutta myös kookoskuidun käyttö on yleistä. Norjassa ja Tanskassa sahajauhon käyttö on erittäin yleistä.

Taulukko 1. Pohjoismaissa peltosalaojituksessa käytettävät ympäryksineet (%) (Rosendahl 1989)

	Tanska	Ruotsi	Norja	Suomi
Sora	25	60	0.5	92
Sahajauho	50	5	80	2
Kookoskuitu	0	33	0	5
Kuitukangas	20	1	0	0.5
Muut	5	1	19.5	0.5
Ojitusala (ha)				
1989	2000	15000	10000	35000
1990	500	14000	9000	30000

Paksut (> 7 mm) orgaaniset esipäällysteet ovat käytössä useimmissa Länsi-Euroopan maissa. Saksassa, Hollannissa ja Belgiassa käytetään yleisesti esipäällystettyjä putkia. Saksassa noin 40 % valmisteista putkista myydään esipäällystettyinä. Yleisin esipäällyste on kookoskuitu. USA:ssa ja Kanadassa käytetään synteettisiä ohuita esipäällysteitä, koska putkikoot ovat suurempia kuin Euroopassa.

4 Rautasaostumat

4.1 Rautasaostuman muodostuminen

Liukenemattoman rautaoksidihydraatin ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$) saostumista rautapitoisesta vedestä kutsutaan rautasaostumaksi tai okrasaostumaksi. Luonnonolosuhteissa saostuma ei ole puhdasta rautaoksidihydraatti-sakkaa, vaan se koostuu useista tuotteista; se sisältää runsaasti mm. $\text{MnO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$:a, Al_2O_3 :a ja orgaanista ainesta. Kolloidinen amorfinen okra on tahmeaa ja siksi kiinnittyy välittömästi kiinteisiin pintoihin ja samalla sitoo liukenemattomia mineraaliyhdisteitä.

Salaojituksen jälkeen osa muodostuneesta rautaoksidihydraatista kulkeutuu salaojaputkeen. Salaojaputkiston kokoojaojiin muodostuu hyytelömäisiä limapisaroihin, jotka laajentuvat estäen vedenkulun salaojassa. Tukkeuma syntyy ensin kohtiin, joissa imuojat yhtyvät kokoojaojiksi, lopulta kaikki salaojaston ulostulot tukkeutuvat. Okrakasvustot tunkeutuvat salaojaputkeen, joka täyttyy lähes kokonaan okralla pienentyneen vedenvirtauksen takia. Uusi salaojitus voi tukkeutua täysin muutamassa vuodessa.

4.2 Okranmuodostuksen kemia

Okra muodostuu rauta- ja maasälpämuodostumien rapautumistuotteista. Suuren rautaoksidi-, rautahydroksidi- ja rautasulfaattipitoisuuden (12-60 %) vuoksi niiden väri vaihtelee vaaleankeltaisesta kellertävänruskeaan. Lämmittämisen ja kuivumisen seurauksena niistä tulee ruosteenpunaisia rauta(III)oksidin (Fe_2O_3) muodostumisen seurauksena.

Ojissa havaittava kellertävä tai punaisenruskea sakka on myös okraa. Tuoreena tämä okra on rihmamaista ja kun se kuivuu ilmassa siitä tulee puuterimaista, amorfista kiinteää ainetta. Okran Fe_2O_3 - pitoisuus yleensä vaihtelee 3 - 66 % välillä. Okra sisältää raudan lisäksi huomattavia määriä myös alumiinia, mangaania, kalsiumia, magnesiumia, rikkiä ja piitä. Arviolta 10 - 20 % okrasta ei liukene vahvaan suolahappoon; tämä liukenematon osa sisältää pääasiassa savi- ja hiekka-ainesta, joka on kiinnittynyt saostumaan. Orgaanisen aineksen määrä saostumassa vaihtelee 20 ja 50 % välillä. Korkeasta orgaanisen aineksen pitoisuudesta voidaan päätellä, että mikro-organismit osallistuvat okran muodostukseen ja saostumiseen. Okran muodostuminen jaetaan kemialliseen ja mikrobiologiseen okranmuodostukseen.

4.3 Kemiallinen okranmuodostus

Okran muodostuminen maassa ja ojissa on seurausta liukoisen raudan saostumisesta gravitaatiovedessä. Se tapahtuu vain silloin kun liukoinen rautaioni altistuu hapen hapettavalle vaikutukselle ojissa, ojasuodattimissa tai savimaan hapettuneen ja pelkistyneen maan rajapinnassa. Raudan hapettumisen kautta tapahtunut kemiallinen okranmuodostus voidaan jakaa puhtaasti kemialliseen ja kolmeen biokemialliseen prosessiin (Glathe & Ottow 1972):

Kemiallinen okranmuodostus:

1 Hapettuminen (auto-oxidaatio) ja isoelektrinen saostuminen redoxpotentiaalin (E_h , O_2 osapaine) ja pH:n muutoksen seurauksena (kuva 5).

Biokemiallinen okranmuodostus:

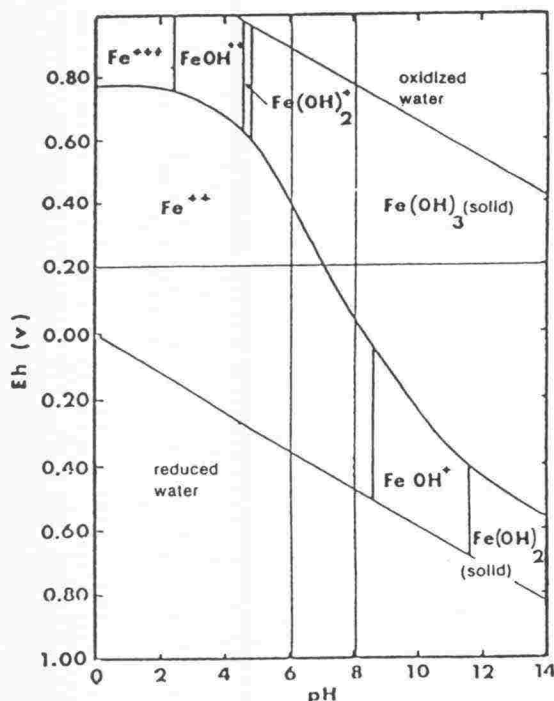
1 Kemolitoautotrofinen rauta(III):n hapettuminen joka vaatii energiaa rautabakteereiden toiminnalle

2 Hapettuminen ilman energiantarvetta herotrofisten bakteereiden vaikutuksesta

3 Saostuminen orgaanisesta rautayhdisteistä heterotrofisten bakteerien vaikutuksesta

Nämä neljä okranmuodostusprosessia voivat tapahtua maassa samanaikaisesti tai toisistaan riippumatta; hiljattain ojitetuilla mailla auto-oksideatio on hallitseva, koska hapen osapaine salaojaputken välittömässä läheisyydessä on suurempi kuin ympäröivässä maassa. Biokemiallinen okranmuodostus on pääasiallisin prosessi silloin kun ojitus on vanhempi ja hapetus-pelkistys -erot ovat pienemmät. Hanert (1974) ja Khrutskaya (1970) ovat arvioineet biokemiallisen okranmuodostuksen olevan 80-98 % ja puhtaasti kemiallisen vain 2 - 20 %.

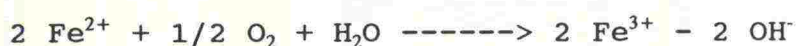
Kemiallisesti ja biokemiallisesti muodostunut okra eroaa hiilipitoisuuden ja adheesiovoimakkuutensa suhteen. Puhtaasti kemiallisesti muodostunut okra voidaan huuhtoa helposti salaojaputkista kun taas biokemiallisesti muodostunut okra voi kiinnittyä tiukasti salaojaputkistoon bakteerieritteiden välityksellä.



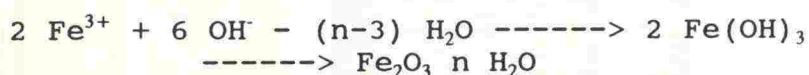
Kuva 5. Raudan saostuminen redoxpotentiaalin ja pH:n vaikutuksesta.

Kemiallinen okranmuodostus tapahtuu kolmessa vaiheessa: hapettuminen, saostuminen ja saostuman kehittyminen (aging).

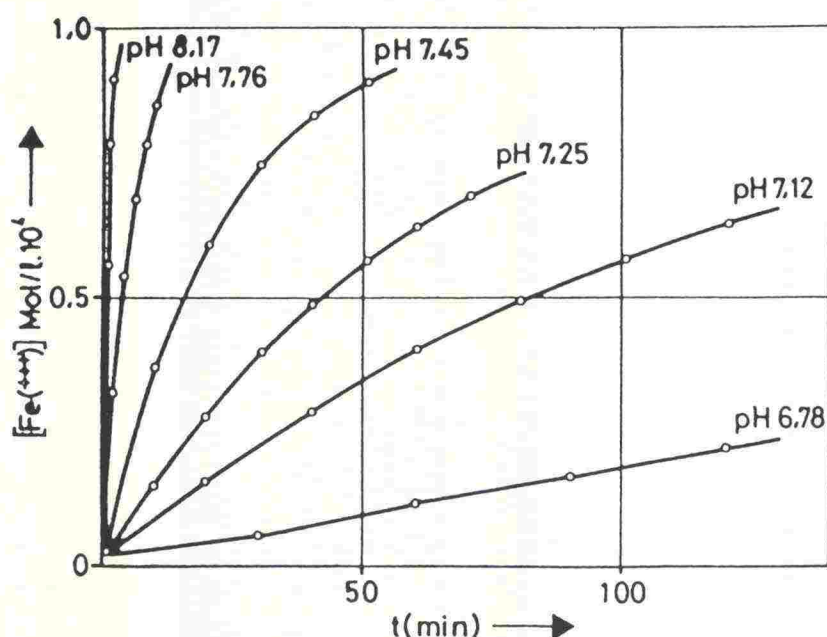
Liukoinen kaksiarvoinen rauta hapettuu ensiksi kolmiarvoiseksi. $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ tasapainon standardipotentiaali on + 0.771 V. Tällaisissa olosuhteissa happi voi hapettaa kaksiarvoisen raudan jopa hieman happamissa olosuhteissa. Hapettuminen tapahtuu paljon nopeammin neutraaleissa tai hieman emäksisissä olosuhteissa (kuva 1). Hapettumisessa vapautuu energiaa 135.6 kJ 2 mol Fe^{2+} kohti:



Syntyneet rauta(III) ionit reagoivat välittömästi vapaiden hydroksyyli-ionien kanssa saostuen liukenemattomiksi rautaoksidihydraateiksi ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), jotka sisältävät vielä vettä ja ovat rakenteeltaan rihmamaisia (gelatinous) ja huokoisia:



$\text{Fe}(\text{OH})_3$:a ei ole vielä kyetty eristämään, kaavaa $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ käytetään kuvaamaan amorfista runsaasti vettä sisältävää rautaoksidihydraattia. Sen liukoisuus riippuu suspension pH:sta (Kuva 6.).



Kuva 6. Veden Fe^{+++} -pitoisuus pH:n ja ajan suhteessa.

Rautaoksidihydraattisaostuman kehittyessä (aging) sen vesipitoisuus pienenee ja se muuttuu alhaisemmaksi rautaoksidihydraatiksi joka on kuitenkin vielä amorfinen:



Amorfinen rautahydroksidi -geeli muuttuu hitaasti kiteiseksi FeOOH :ksi (goetiitiksi), muutosnopeudeksi on arvioitu noin 4 % 3 vuodessa (Krause ja Glezuchowska 1962). Kaksiarvoisen raudan välitön hapettuminen ilmenee ojavesien ruosteenruskeana värinä (kuva 7)



Kuva 7. Raudan saostuminen ilmenee veden ruosteenruskeana värinä (kuva Hannu Autio).

4.4 Liukoinen rauta pohjavedessä, gravitaatiovedessä ja pintavedessä

Fe(III) ioneja voi esiintyä vedessä ainoastaan hyvin pieninä pitoisuuksina koska Fe(II) ionit ovat helposti hapettuvia ja Fe(III) oksidihydraatin liukoisuus riippuu hyvin alhaisesta rH/pH:sta (kuva 5). Runssahappisessa pintavedessä on havaittu mitattavia pitoisuuksia vapaita Fe(III) -ioneja vain kun pH on suurempi kuin 3. Myös gravitaatioveden Fe(III) -ionipitoisuudet ovat pieniä kun taas hapettomissa pohjavesissä voimakkaasti pelkistävien yhdisteiden (rikki, orgaaninen aines) läsnäollessa pitoisuudet voivat olla hyvinkin suuret.

Rautaionit voivat olla kiinnittyneenä maan ioninvaihtopaikkoihin. Ne voivat esiintyä myös erilaisissa hydrolyysituotteissa; rauta(II) hydroksidi, rauta(II) karbonaatti (sideriitti), rauta(II) sulfidi (pyriitti) ja rauta(II) fosfaatti (vivianiitti). Näiden yhdisteiden rauta muuttuu helposti liukoiseksi hapen vaikutuksesta.

Pintavesistä, gravitaatiovesistä ja pohjavesistä voidaan mitata huomattavasti korkeampia liukoisen raudan pitoisuuksia mitä standardipotentiaali edellyttäisi. Tällöin orgaaniset kompleksoivat yhdisteet stabiloivat rauta(III) -ionit vedessä. Tyypillisiä tällaisia yhdisteitä ovat mm. humushapot ja tanniinit sekä muut polyhydroksifenolit, jotka eivät hapetu kemiallisesti vaikka happea olisi läsnä.

Rautakelaattien pysyvyys paranee vesiliuoksen pH:n suuretessa. Ne ovat kaikkein pysyvimpiä hieman emäksisessä ympäristössä (pH 5 - 9). Voimakkaat hapot ja emäkset voivat saostaa ne. Mikro-organismit voivat hajoittaa nämä kelaatit maassa ja vedessä, jolloin vapautuva rauta hapettuu ja saostuu rautaoksidihydraattina. Tämä saostumisprosessi kuvaa kolmatta biokemiallista okranmuodostusta: "Saostuminen orgaanisesta rautayhdisteistä heterotrofisten bakteerien vaikutuksesta".

4.5 Mikrobiologinen okranmuodostus

Mikrobiologinen okranmuodostus perustuu erilaisten bakteerikasvustojen aiheuttamaan salaojien tukkeutumiseen. Se ei ole suoraviivainen prosessi, vaan se voidaan jakaa kolmeen ekofysiologisesti erilaiseen tyyppiin. Luonnonolosuhteissa nämä prosessit voidaan erottaa toisistaan ainoastaan täysin eristettyinä biotooppeina. Mikrobiologisesti ne jaetaan rauta(III) oksidin muodostumisessa vaadittavien kasvuolosuhteiden ja energiatuoton mukaan kolmeen päätyyppiin :

- 1) Sauvamaiset, asidofiiliset, kemolitoautotrofiset rautabakteerit, joiden suku on Thiobacillus (T. ferro-oxidans);
- 2) Rihmamaiset rautabakteerit, jotka kuuluvat sukuihin Gallionella ja Leptothrix sekä rihmaa erittäviä, värittämiä, rikkiä hapettavia bakteereita tyyppiä Thiothrix;
- 3) Heterotrofiset mikro-organismit, jotka pystyvät mineralisoimaan organo-mineraalien ligandeja (useat bakteerit, aktinomykeat, sienet)

Okranmuodostumisen mikrobiologisen tyyppin määrää mobilisoituneen raudan luonne ja ympäristöolosuhteet. Kemiaallinen ja biokemiaallinen okranmuodostus ovat riippuvaisia hapen osapaineesta; ts. mitä parempi happitilanne, sitä nopeammin hapettuminen tapahtuu. Ainoastaan rauta, joka on sitoutunut ke-laattikomplekseihin ei voi saostua suoraan puhtaasti kemiallisesti hapen vaikutuksesta, vaan niiden saostamiseen tarvitaan aktiivista biologista hajoitusta.

Rautaoksidien ja okran muodostuminen kompleksoituneista rauta- ja mangaani-ioneista on tärkeä salaojaston tukkeutumisen kannalta. Erikoisesti heterotrofiset mikro-organismit hajottavat rauta(II,I-II) organoyhdisteitä.

4.5.1 Tiobasillit

Asidofiiliset, sauvamaiset Thiobacillus-suvun bakteerit ovat merkittäviä tekijöitä kolmiarvoisen raudan hapettumisessa ja okranmuodostuksessa salaojaputkessa. Tiobasillit vaativat kasvuunsa **erittäin happamat olosuhteet** (pH 2,5-4,2) kasvuunsa. Neutraaleissa olosuhteissa ne kuolevat nopeasti.

Pohjanmaan liejusavialueilla, pohjaveden alapuolella, pelkistyneissä kerroksissa on runsaasti rautasulfideja (FeS, FeS₂). Tiobasillit (Thiobacillus ferrooxidans) hapettavat tehokkaasti rautasulfideja rautasulfaatiksi ja rikkihapoksi ilman hapen vaikutuksesta:



Reaktiossa syntynyt happamuus lisää T. ferrooxidans-bakteerin aktiivisuutta salaojaputken ympärillä. Lisääntyneet bakteerikasvustot sitovat rau-

tasaostumia ja mineraaliainesta ja aiheuttavat tukkeuman. Reaktiossa vapautunut rautasulfaatti (FeSO_4) kulkeutuu salaojaputkeen. Juuri ennen joutumistaan putkeen se hapettuu rautabakteerien vaikutuksesta ja hydrolysoituu ja hydrolysoitunut rauta tarttuu bakteerikasvustoon:



4.5.2 Rihmamaiset rautabakteerit

Heikosti happamissa ja neutraaleissa olosuhteissa (pH 5-8) ja hapellisissa olosuhteissa (Eh +200 - +500 mV) rihmamaiset rautabakteerit saostavat rauta- ja mangaanihydraatteja solukalvojensa sisä- ja ulkopuolelle. Fe^{++} -ionien kemiallinen hapettuminen tapahtuu myös samoissa pH-Eh -olosuhteissa, minkä vuoksi kemiallista ja mikrobiologista okranmuodostusta on mahdotonta erottaa toisistaan.

Rihmamaiset rautabakteerit jaetaan kolmeen ekotyyppiin niiden rauta- ja mangaanitarpeen ja kuoren rakenteen mukaan: Sphaerotilus-leptothrix, Gallionella spp. ja Thiothrix spp. Näistä Gallionella spp. on Suomen olosuhteissa parhaiten tunnettu rautabakteeri, joka pyrkii tehokkaasti hapettaa raudan neutraalista vedestä (pitoisuuteen 12 mg $\text{Fe}(\text{II})/\text{l}$ asti).

4.5.3 Organoionisten yhdisteiden mineralisoituminen

Rauta(III) oksidihydraattien saostuminen organoionisista yhdisteistä on merkittävä tekijä okranmuodotuksessa; eräät heterotrofiset mikro-organismit pysyvät käyttämään energianlähteenään rauta(II,III) ligandien orgaanisen osan hiiltä ja tyypeä vapauttaen samalla vapaan rauta(III) oksidin. Tällaiset mikro-organismit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1 Sauvamaiset gram-negatiiviset bakteerit (Enterobakteerit, Acinetobakteerit jne)

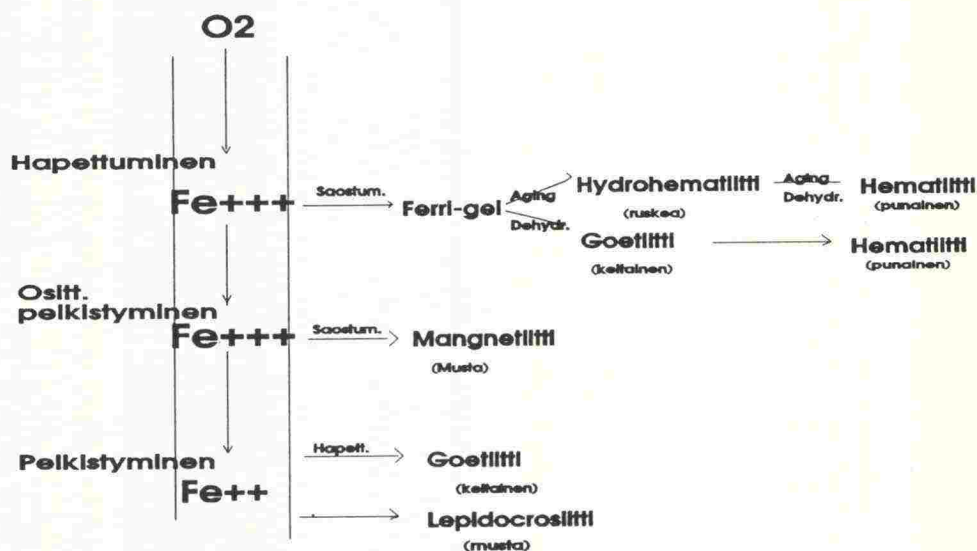
2 Rihmoja muodostavat bakteerit (Pedomicrobium, Metallogenium)

3 Erilaiset homesienet ja hyppyhäntäiset (Nocardia spp., Strptomyces spp.)

Nämä mikro-organismit aiheuttavat rautasedimenteissä ja rautapitoisissa vesissä kolmiarvoisen raudan saostumisen ja edesauttavat tehokkaasti salaojaston tukkeutumista.

4.6 Okranmuodostumisen riskialueet Suomessa

Gravitaatioveteen, pohjaveteen ja ojaveteen liuenut rauta on peräisin rautapitoisesta kiviaineksesta ja mineraaleista. Erilaiset geologiset lähtöaineet, savet ja sedimentit sisältävät hyvin erisuuruisia määriä rautaa. Rauta vapautuu näistä kemiallisen rapautumisen tuloksena kun hapettumiselle otolliset olosuhteet ovat olemassa - ilmastuminen, korkea redoxpotentiaali ja pH. Hapetusolosuhteet ja samalla raudan yhdisteet muuttuvat maaprofiilissa vesipitoisuuden vaikutuksesta (kuva 8.).



Kuva 8 Rautaoksidihydraattien muodostuminen maaprofiilissa erilaisissa hapetus-pelkistys -olosuhteissa.

Suomen ja etenkin Pohjanmaan rannikkoalueet ovat vanhaa merenpohjaa korkeustasolle 60 m meren pinnan yläpuolella. Tällä alueella sijaitsi aikoinaan (noin 7 000 vuotta sitten) ns. Litorinameri, joka oli muodostunut mannerjään sulamisvesistä (kuva 10). Sulamisvedet olivat irrottaneet runsaasti rautaa, rikkiä ja happamuutta peruskalliosta mereen. Litorinamerivaiheen aikana oli pitkä lämmin jakso, jolloin vesien mikrobitoiminta oli vilkasta. Tällöin meren pohjaan sedimentoitui runsaasti eliömateriaalia. Eliömateriaali saosti mukanaan runsaasti rautaa ja rikkiä, jotka mineralisoituivat rautasulfidiksi. Litorinameren sedimentit sisältävät 1-5 %

rautasulfidia (kuva 9).

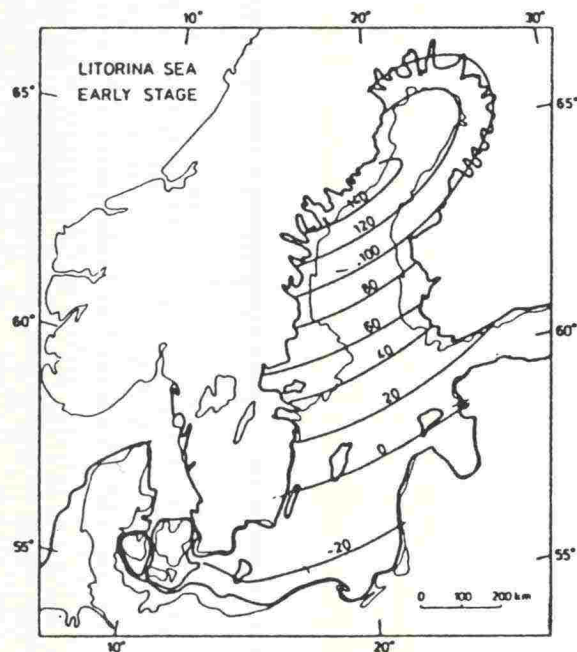


Kuva 9. Musta rautasulfidikerrostuma (Litorinameri-kerrostuma) esiintyy Pohjanmaan rannikkoalueilla välittömästi pohjaveden pinnan alapuolella maan happomissa kerroksissa. Ojituksen seurauksena rautasulfidi hapettuu, jonka seurauksena maaprofiilissa on runsaasti liukoista rautaa.

Mannerjään painanne kohoaa vähitellen, maankohoaminen on Merenkurkun alueella noin 1 cm/v. Tällöin rautasulfidisedimentit paljastuvat ja joutuvat ilman hapen kanssa kosketuksiin ja hapettuvat raudaksi ja rikkihapoksi. Kun näitä alueita ojitetaan, raudan ja happamuuden vapautuminen on voimaksata. Tällaiset olosuhteet ovat erittäin soveliaita Tiobacillus ferrooxidans -bakteerin hapettavalle ja rautaa saostavalle vaikutukselle. Tämä bakteeri kasvaa

salaojaputkessa kun vesi on hapanta ja happea on läsnä. Useassa ojitustilanteessa salaojaston tukkeutuminen voi tapahtua näillä alueilla muutamassa vuodessa salaojituksen jälkeen.

Litorinamerisedimentin hapettumisen seurauksena syntyneitä maita nimitetään happamiksi sulfaattimaiksi (sulphic gryaquept). Happamien sulfaattimaiden alueellinen esiintyminen on laikuttaista. Yksin viljelyksessä olevia happamia sulfaattimaita on Suomessa yli 200 000 ha (Palko et al. 1988). Suurimmat keskittymät sijaitsevat Vaasan ja Kokkolan välisellä rannikkoalueella. Litorinameren rajaviivan perusteella riskialueet voidaan karkeasti rajata (kuva 10).



Kuva 10 Litorinamerialue ja sen isobaasit. Uloin yhtenäinen rantaviiva on 100 m merenpinnan yläpuolella Pohjanlahden rannikolla, jonka alapuolella happamat sulfaattimaat esiintyvät. Etelä-Suomessa ylin rantaviiva on selvästi alhaisemmalla korkeustasolla (20 - 60 m mpy).

4.7 Okran muodostumisherkkyiden määrittäminen

Rakennuskohteen salaojitusta suunniteltaessa on usein tarpeellista määrittää alueen okranmuodostusherkkyys. Okranmuodostusta voidaan karkeasti arvioida maaston luonteen mukaan (taulukko 2).

Taulukko 2. Maaston luonteen mukainen okranmuodostuksen arviointi

Okranmuodostus	Pintakerros	Pintavesi	Pohjamaa	Keski-kerros
Heikko	Avomaa (hiekkä)	Kirkas	Ei rautasedimenttiä	Ei rautasaostumia
Kohtalainen	Osittain Multamaa	Ajoittain okrasaostumia	Punertavan ruskea	Vaihtelevia rautasaostumia
Suuri	Multamaa	Ruskehtavanpunainen väri	Tummanharmaa lieju	Voimakka. ruskeita saostumia
Eritt. suuri	Multamaa	Samea ruskea väri	Pikimusta lieju	Ruskeita saostumia, keltaisia jyväsiä

Tarkempi arvio on mahdollista vain hydrologisen ja maaperän kemiallisen tutkimuksen kautta. Arvio voidaan tehdä joko

- 1 Tutkimalla maaveden ominaisuuksia tai
- 2 Tutkimalla maaprofiilin kemiallisia olosuhteita

Maavesinäyte otetaan kairanreijästä. Aluksi kairanreikä pumpataan tyhjäksi useita kertoja, jonka jälkeen vesinäyte suodatetaan astiaan. Vedestä määritetään:

- 1 Kokonaisrautapitoisuus Fe_t
- 2 Fe^{++} :n osuus kokonaisraudasta (Fe^{++} pitoisuus)
- 3 pH

Jos näytteestä määritetään Fe^{++} -pitoisuus laboratoriossa, näytteeseen on lisättävä välittömästi rikkihappoa jotta raudan hapettuminen ei tapahtuisi.

Mitä suurempi Fe^{++} osuus kokonaisraudasta on ja mitä alhaisempi on pH, sitä suurempi riski okranmuodostukseen on olemassa (taulukko 3). Pohjavesitutkimuksen heikkouksina on tutkimuksen vaivalloisuus (lab.kokeet) sekä se, että Fe^{++} -pitoisuus vaihtelee maavedessä huomattavasti vuodenajan ja hydrologisten olosuhteiden mukaan, jolloin okranmuodostusherkkyyden arviointi tulee epävarmemmaksi.

Taulukko 3. Okranmuodostumisherkkyyys pohjaveden Fe^{++} pitoisuuden ja pH:n suhteessa. Tulokset perustuvat useisiin satoihin kenttätutkimuksiin (Kuntzke & Eggelsmann, 1968)

Fe^{++} pit. mg/l pH < 7	Fe^{++} pit. mg/l pH > 7	Okranmuodostusherkkyyys
< 0.5	< 1.0	Ei ole
0.5 - 1.0	1.0 - 3.0	Vähäinen
1.0 - 3.0	3.0 - 6.0	Kohtalainen
3.0 - 6.0	6.0 - 9.0	Suuri
> 6.0	> 9.0	Eritt. suuri

Maaprofiilin kemiallisten olosuhteiden tutkiminen
 okranmuodostusherkkyyden määrittämiseksi tapahtuu kairaamalla läpivirtauskairalla maaprofiili 0 - 200 cm:n syvyysväliltä. Kairasta tutkitaan kentällä 10 cm:n välein:

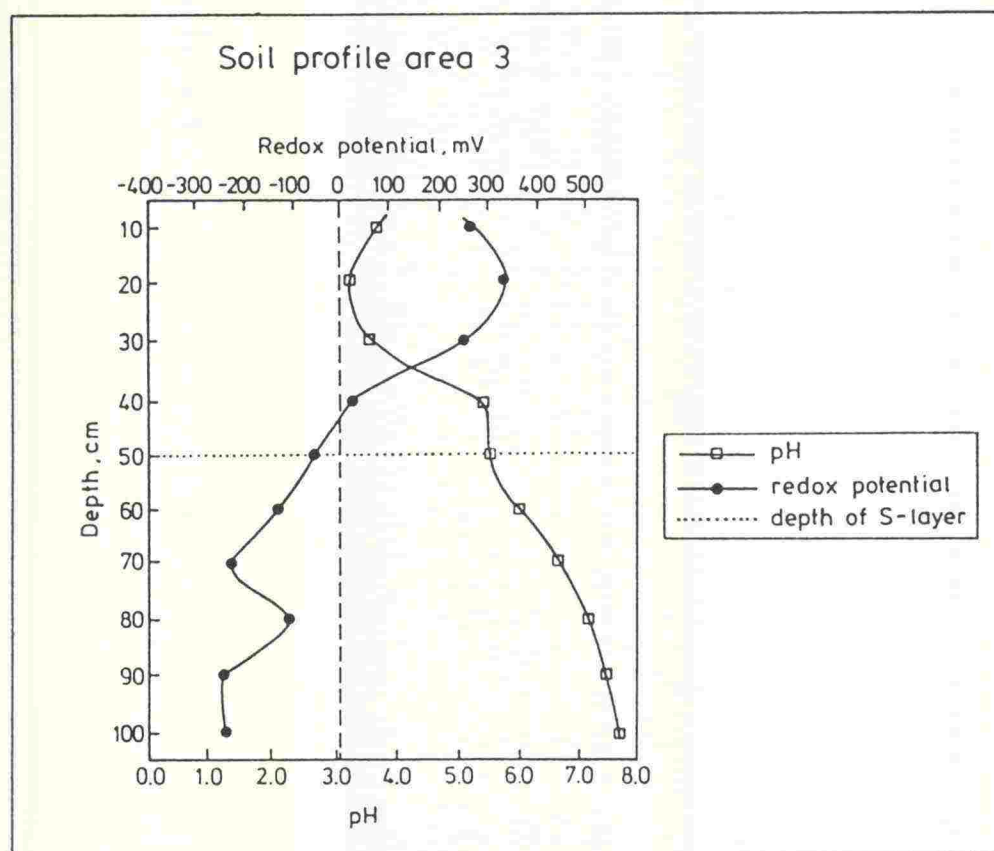
- 1 Maalaji
- 2 Redoxpotentiaali (Eh)
- 3 pH

Maalajin perusteella pystytään arvioimaan mahdollinen okranmuodostus ja tunnistamaan mahdollisen mustan sulfidisaven tai liejun esiintyminen.

Redoxpotentiaalin (veden hapetus-pelkistys tilan) määrittäminen on vaihtoehtoinen Fe^{++} määrittäminen, koska se kuvaa maaveden hapetus-pelkistysvoimakkuutta joka taas kuvaa $\text{Fe}^{++}/\text{Fe}^{+++}$ suhdetta salaojittussyvytydellä. Redoxpotentiaalin mittaaminen tapahtuu redox -elektrodilla ja millivolttimittarilla. Redox-elektrodi koostuu yleensä platina-elektrodista (Pt) ja lasielektrodista, joiden keskinäinen jännite on vakio. Kun mittaelektrodi (Pt) luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja, elektrodien välinen jännitteen muutos tasapainotilassa ilmoittaa liuoksen hapetus-pelkistystilan. Redoxpotentiaali -arvo on riippuvainen pH:sta. Maan pH ja Eh-arvojen perusteella voidaan arvioida maaprofiili-alue, jossa

okranmuodostus on voimakkainta (kuva 11). Palko et al. 1988 ovat esittäneet yksityiskohtaisesti kairausvälineistön ja tutkimukseen liittyvän tekniikan.

Maaperän kemiallisten olosuhteiden tutkimusella voidaan arvioida okranmuodostusta suomalaisissa olosuhteissa nopeasti (kaksimiehinen työryhmä tutkii päivässä noin 10 kohdetta). Arvio on maaveden tutkimusta varmempi, lisäksi kairatutkimuksesta voidaan ottaa maanäyte jos lisätutkimuksiin on aihetta.



Kuva 11. Tyypillinen pH- ja Eh- profiili runsaasti rautasulfideja sisältävässä maaprofiilissa. Eh-potentiaalin pienetessä Fe^{++} pitoisuus suurenee suhteessa kokonaisrautapitoisuuteen (Palko et al. 1988).

5 Toimenpiteet okranmuodostuksen vähentämiseksi sala- ojaputkessa

Okran kemiallinen ja mikrobiologinen muodostumi-
nen mahdollistaa sen torjumisen usealla eri taval-
la. Toimenpiteet voidaan karkeasti jakaa kolmeen
erilaiseen ratkaisuun:

- 1 Raudan hapettumisen ja saostumisen edistäminen
maassa**
- 2 Saostuman estäminen ojassa**
- 3 Toimenpiteet okran poistamiseksi ojasta**

5.1 Raudan hapettumisen ja saostumisen edistäminen maassa

Maanmuokkausta (syväkyntö) ja **pintamaan tehokasta
kalkitusta** käytetään yleisesti raudan hapettumisen
edistämiseen pelloilla. Toimenpiteet on toistettava
säännöllisin väliajoin, minkä vuoksi ne eivät so-
vellu tierakenteen salaojitukseen. Sen sijaan eri-
laisten rautaa saostavien aineiden käyttö salaoja-
putken ympärillä soveltuu hyvin näihin kohteisiin.

Ympärysaineina raudan saostumisen edistämässä on
käytetty erilaisia neutraloivia materiaaleja kuten
kalkkikiveä ja terästehtaan kuonaa. Uutena ratkai-
suna on kokeiltu ojakaivannon kalkitsemista polte-
tulla kalkilla.

5.1.1 Neutraloivat kiviainekset ympärysaineina

Neutraloivia kuonajalosteita on käytetty soran si-
jasta salaojien ympärysaineina. Näiden lisäteho
soraan verrattuna on siinä, että ne saostavat rau-
taa ja estävät jossain määrin rautabakteerien kas-
vuston muodostumista. Kuonajalosteiden riittävä
neutralointivaikutus on kuitenkin epävarmaa, koska
ympärysaineen pH:n tulisi pysyä jatkuvasti yli
9,0:n jotta bakteerikasvustoa ei pääsisi muodostu-
maan. Tämän vuoksi kuonan käyttö edellyttää luon-
nonkoejärjestelyä, jossa mitataan *in situ* jatkuvasti
kuonaympärysaineen ominaisuuksien muuttumista.

5.1.2 Ojakaivannon kalkitus poltetulla kalkilla

Poltetun kalkin lisääminen ja sekoittaminen saveen on todettu suurentavan tehokkaasti saveen vedenläpäisevyyttä. Vedenläpäisevyys suurenee kalkkipitoisuuden suuretessa aina 7 - 10 % kalkkilisäykseen asti saveen lajitekoostumuksesta ja kemiallisista ominaisuuksista riippuen (Palko 1990). Kalkkilisäys nostaa saviaineksen pH:n suuremmaksi kuin 12, missä olosuhteissa kaikki rauta saostuu. Suotovesien pH vaihtelee 10 - 12 välillä, missä olosuhteissa rautabakteerit eivät voi toimia. Kun poltettua kalkkia sekoitetaan koko salaojakaivannon osuudelta, kaivannosta saadaan tehokas rautasaostin ja rautatukkeutumat pystytään estämään kokonaan.

Menetelmää on kokeiltu vuodesta 1992 Oy Nordkalk Ab:n ja Oulun vesi- ja ympäristöpiirin toimesta Hagan koekentällä Aurajoen varrella. Koe käsittää 8 lysimetrikoetta (erilaiset kalkkilisäykset ja pelkkä savi) sekä suoto-ojakokeen. Kalkki-savi -seoksella täytetyt lysimetriastiat on kaivettu maahan ja niitä on sadetettu tehokkaasti Aurajoen vedellä. Läpivirranneiden suotovesien määrää ja laatua on seurattu sadetuksen kuluessa. Suoto-ojakoe käsittää kaksi salaojitettua rinnepeltoaluetta, joihin rinteen alapuolelle Aurajokea vastaan on tehty salaojitus, jonka kaivanto on täytetty poltetun kalkin ja saveen seoksella.

Kokeiden perusteella voidaan todeta, että poltetun kalkin saveen ranteeseen aiheuttama vettäläpäisevä mururakenne on pysyvä, rauta jää tehokkaasti ojaan ja rautabakteerikasvustoa ei ole havaittavissa ulostuloputkissa kuten pelkkää savea sisältävien koeastioiden ulostuloputkissa. Lisäksi kalkkioja pidättää tehokkaasti ravinteita, etenkin fosforia (Palko 1991, 1992). Rakennettaessa kalkkisuoto-oja erittäin runsaasti rautaa sisältävälle maalle on syytä ensin *in situ* koeolosuhteissa todeta pientyykö salaojakaivannon vedenläpäisevyys merkittävästi runsaan $\text{Fe}(\text{OH})_3$:n saostumisen seurauksena.

5.2 Saostuman estäminen ojassa

5.2.1 Sora ympärysaineena

Salaojitukset yleensä suunnitellaan siten, että ympärysaineena peltosalaojituksessa on **sora**. Soraa pannaan 4-5 cm putken yläpinnan ympärille. Liettyvissä maalajeissa on joskus tarpeen panna 3-4 cm:n sorakerros kaivannon pohjalle ennen putken asettamista (Saavalainen, J 1984). Aiemmin soranlisäyksen tehtävänä oli estää liettyvien maa-ainesten kulkeutuminen veden

pääsyä putken ympäristöstä putkeen ja suojata putkea työnaikaisilta liettymiltä. Soran on kuitenkin todettu estävän jonkin verran raudan saostumista ennen sen joutumista salaojaputkeen parantamalla maan hydraulista johtavuutta salaojan ympärillä.

5.2.2 Orgaaniset materiaalit ympärysaineina

Yleensä jos soraa ei ole ollut saatavissa ympärysaineeksi se on korvattu **sahajauholla, oljilla tai turpeella**. Sahajauho on näistä yleisimmin käytetty ja parhaimmaksi todettu. Sahajauhon tulee olla karkeata, havupuusta sahattua eikä siinä saa olla kuoren osia. Sahajauhoa on käytetty yleensä enemmän kuin soraa, 20-30 cm putken ympärillä (Saavalainen, J. 1984). Sahajauhon todettiin estävän soraa tehokkaammin rautasaostuman tukkeutumisen rautapitoisilla mailla (Ford & Spencer 1962, Eggelsman & Scheffer 1970). Sahajauhon on arveltu pienentävän rautasaostumia lähinnä siksi, että puuaineksen orgaaniset hapot, etenkin tanniini, pyrkivät kompleksoimaan raudan ja estävät sen saostumisen salaojaputkessa.

Pintaturvetta pellettinä on jonkin verran kokeiltu myös ympärysaineena rautasaostuman estossa. Humuksen sisältämät humushapot kompleksoivat tehokkaasti kaksiarvoista rautaa ja pitävät sen liukoisessa muodossa. Turpeen maatuessa sen vedenjohtavuus pienenee jyrkästi ja tämän vuoksi sen käytöstä useammissa tapauksissa on luovuttu.

5.2.3 Vedenalainen salaojitus

Vanhan salaojitussuosituksen mukaan rautapitoisilla mailla tulisi käyttää vedenalaista salaojitusta. Tällä pyritään estämään ilmakehän hapen pääsy ojaan raudan hapettumisen estämiseksi. Tällaisessa ojituksessa purkuputki tehdään niin syvään tai sitä padotetaan niin paljon, että putki on aina täynnä vettä koko ajan. Nämä toimenpiteet yleensä tehdään kuivatustehon kustannuksella ja siksi niiden käyttöä voidaan ajatella tierakenteen kuivatuksessa ainostaan poikkeustapauksessa.

5.2.4 Putkimateriaalin valinta

Muovimateriaalit ovat yleensä sähköisesti varautuneita ja pöly, lika sekä väriaineet kiinnittyvät niihin tiukkaan. Vesi sitoutuu huonosti muoviin ja koska PVC/vesi -sidos on voimakkuudeltaan suurempi

kuin PVC/ilma -sidos. PVC:n ja veden välille muodostuu laaja kontaktipinta (Hartge & Heinemann 1970). Raudan hapettuminen tapahtuu helposti tässä kontaktipinnassa, jos rauta on Fe(II) ioneina vedessä. Kiinnittymisvoimakkuudet muoviputkiin on yleensä 20 % suurempi kuin tiiliputkiin mikä vuoksi tiiliputket ovat muoviputkia suositeltavampia okranmuodostukselle herkillä alueilla.

5.3 Toimenpiteet okran poistamiseksi salaojasta

Suunniteltu okran muodostuminen ennen tai jälkeen sen joutumista salaojaan ei aina onnistu. Tällöin ainoaksi keinoksi jää okran poistaminen salaojaputkesta. Tässä käytetään kolmea menetelmää: matalapainepuhdistusta, korkeapainepuhdistusta ja kemiallista okranpoistoa.

Matalapainepuhdistuksella pyritään poistamaan tik-sotrooppinen okrasaostuma. Käytettävä paine on 2 - 4 bar ja tarvittava vesimäärä 2 - 5 dm³/m putkikoosta riippuen. Kun matalapainepuhdistus toistetaan joka vuosi, sillä voidaan pitää salaojasto hyvässä toimintakunnossa jopa voimakkaan okranmuodostuksen alueilla.

Korkeapainepuhdistuksessa käytetään jopa 100 bar paineita. Savitukkeumille käytetään vettä 1.5 - 5.2 m³/100 m ja okranpoistoon 1.1 - 3.1 m³/100 m salaojaa. Spiraalisuihkupäällä voidaan tehokkaasti irrottaa bakteerikasvusto sekä juuriston aiheuttama tukkeuma salaojaputkien seinämistä.

Kemiallista okranpoistoa on käytetty menestyksekkäästi biokemiallisesti muodostuneen rautasaostuman liuottamiseksi salaojaputkesta. Puhdistukseen on käytetty 10 % HCl -liuosta, joka liuottaa tehokkaasti rautaoksidin. Myös rikkihappoa on kokeiltu menestyksellisesti. Tämä menetelmä on suhteellisen kallis ja vaatii aina liuotinviesien neutraloinnin, mutta menetelmä voi soveltua vaikeisiin erikoistapauksiin, joissa mitään muuta keinoa ei enää ole olemassa.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Rautasaostuman (okranmuodostuksen) aiheuttama salaojaputken tukkeutuminen on lähes poikkeuksetta seurausta raudan kemiallisesta saostumisesta ja rautabakteerikasvustojen muodostumisesta salaojaputkessa. Raudan kemialliseen saostumiseen vaikuttavat salaojaveden kaksiarvoisen liukoisen raudan pitoisuus (Fe^{++}), pH ja hapetus-pelkistys olosuhteet (redoxpotentiaali, Eh).

Fe^{++} -pitoisuus riippuu suoraan pH:sta, jos rautapitoisuus ylittää happamissa olosuhteissa 1,0 mg/l, se riittää aikaansaamaan olosuhteet otollisiksi salaojaputken tukkeutumiselle, neutraaleissa ja lievästi emäksisissä pH olosuhteissa okranmuodostukseen vaaditaan korkeampi rautapitoisuus (> 3 mg/l). Kaksiarvoisen raudan kemiallinen saostuminen on suoraan riippuvainen pH:sta ja Eh:sta. Happamissa olosuhteissa (pH $< 5,0$) rauta pysyy liukoisena ja huuhtoutuu salaojaputkesta vesistöön. Rauta saostuu tehokkaasti kun pH nousee, pH 8,0 yläpuolella kaikki liukoinen rauta on saostunut. Raudan saostuminen tarvitsee myös hapettimen läsnäolon. Redoxpotentiaali kuvaa hapettavien yhdisteiden määrää, kun Eh $> + 200$ mV raudan saostuminen luonnonoloissa on lähes esteetöntä ja mitä alhaisemmaksi Eh laskee sitä epätodennäköisempää raudan saostuminen on.

Bakteerikasvuston muodostuminen raudan kemiallisen saostumisen ohella on välttämätön edellytys okranmuodostukseen salaojaputkistossa. Bakteerikasvustot erittävät salaojaputkiston sisäpintaan lima-ainetta, jolla kasvusto kiinnittyy tehokkaasti siihen. Näin rihmasto kasvaa putkeen sitoen kemiallisesti saostuneen raudan ja putkeen huuhtoutuneen mineraaliaineksen ja salaojaputkisto tukkeutuu. Bakteereiden kasvu ei ole kemiallisesti niin yksinkertaista kuin raudan saostuminen. Tämä johtuu siitä, että kasvuston muodostavia bakteereita on useita. Yleisimmät näistä ovat Thiobacillus ferro-oxidans ja Gallionella -suvun bakteerit. Edellinen rautabakteeri toimii happamissa ja jälkimmäiset neutraaleissa ja lievästi emäksisissä olosuhteissa. Kun pH nostetaan yli 8,0, mitkään bakteerit eivät pysty toimimaan okrasaostuman muodostumisessa.

Kemiallista saostumista ja bakteerikasvuston muodostumista salaojaputkessa pyritään estämään kahdella eri periaatteella; olosuhteita muutetaan siten, että rauta ei saostu vaan huuhtoutuu salaojaputkesta tai rauta pyritään saostamaan kokonaan ennen kuin se ehtii salaojaputkeen. Yleisimmin käytetään

tetyt toimenpiteet raudan saostumisen estämisessä ovat vedenalainen salaojitus ja orgaanisten materiaalien käyttö ympärysaineina. Raudan saostamisessa ennen sen joutumista salaojaputkeen käytetään karkearakeisia neutraloivia mineraaliaineita.

Vedenalaisella salaojituksella pyritään pitämään salaojaputken olosuhteet mahdollisimman pelkistyneenä, jolloin hapettavia aineita on vähän ja rauta ei pääse saostumaan salaojaputkessa. Orgaanisten ympärysaineiden (mm. sahanpuru, turve) vaikutus perustuu orgaanisten rautakelaattien muodostumiseen, jolloin rauta ei ole helposti saostuva edes hapettavissa olosuhteissa. Orgaanisten ympärysaineiden heikkoutena on niiden suhteellisen nopea maatuminen, jonka jälkeen niiden vedenjohtavuus pienenee voimakkaasti. Karkearakeiset neutraloivat mineraaliaineet (mm. kuona, kalkkikivi, savi-CaO -seos) toimivat tehokkaina raudan kemiallisina saostajina, samalla ne estävät bakteerikasvun salaojaputkessa. Kalkin lisäys saveen aiheuttaa flokkulaatioreaktion, jolloin saveen rakenne muuttuu pysyvästi karkearakeiseksi. Samalla kalkki toimii raudan tehokkaana saostajana ja bakteeritoiminnan estäjänä. Tätä seosta on käytetty tehokkaasti erilaisissa ojarakenteissa vedenläpäisevyyden parantajana ja erilaisten kemiallisten yhdisteiden saostajana.

Kirjallisuus

- Eggelsman, R. ja Scheffer, B. 1970. Dränfilter gegen Verockerung. Ergebnisse des Feldversuches calhorn. Wasser und Boden, 29 : 8-10.
- Ford, H.W. ja Spencer, W.F. 1962. Iron oxide in drain lines. Proc. Florida State Horticultural Soc., 75 : 67.
- Glathe, H. ja Ottow, J.C. 1972. Ecological and physiological aspects on the mechanism of iron oxidation and ocher formation. Infektionskrankheiten und Hygiene, 127 : 749-769.
- Hanert, H. 1974. In situ studies on analysis and intensity of iron(III) precipitation in drains. Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 15 : 18 -90.
- Hartge, K. ja Heinemann, C. 1970. Iron clogging of drainpipes und plastic - a hypothesis. Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 11 : 162-165.
- Hove, P. 1982. Filter materials for drains - experiences in Norway. Zeitschrift fur Kulturtechnik und Flurbereinigung. 23(2) : 104-109.
- Khrutskaya, Z. 1970. Clogging of drain with ferrous compounds of iron. Publ. House Kolos, Moscow
- Krause, A. ja Glezuchowska, J. 1962. The aging of dried iron(III) hydroxide gel which is amorphous to x-rays. Kolloid-Zeitschrift, 181 : 69.
- Kuntzke, H. ja Eggelsmann, R. 1968. Comparison of ocher adhesion and drag force of water in drainpipes. Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 14 : 285-292
- Palko, J. 1991. Kalkin ja rikinpoistotuotteen käyttö savimaan vedenläpäisevyyden parantamisessa ja ravinteiden pidättämisessä. Oulun vesi- ja ympäristöpiirin julkaisuja. 25 s.
- Palko, J., Merilä, E. ja Heino, S. 1988. Kuivatuksen suunnittelu happamalla sulfaattimailla. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja 21.
- RIL 1979. Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus.- Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL 126. Vammala. 103s.
- RIL 1987. Salaojaputket. Laatuvaatimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL 128. Helsinki. 18s. ISBN 951-758-151-3.

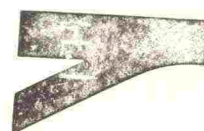
Rosendahl, R. 1989. Pohjoismaisia kokemuksia erilaisista peltosalaojituksen ympärysaineista. Helsinki. s. 23-24. Salaojituksen tutkimusyhdistyksen tiedote Nro 9. ISSN 0783-392X.

Saavalainen, J. 1983. Salaojittajan käsikirja, Osa 1B. Kuivatuksen perusteet. Salaojituksen kannatusyhdistys. Helsinki. 83s. ISBN 951-99577-0-7.

Saavalainen, J. 1984. Salaojittajan käsikirja. Osa II. Salaojituksen kannatusyhdistys.

Saavalainen, J, 1991. Salaojittajan käsikirja, Osa III Salaojituksen toteuttaminen, kunnossapito ja täydennysojitus. Helsinki. 49s. ISBN 952-90-2728-1.

TVL, 1991. Kuivatus, syväkuivatuksen suunnittelu. Julk. tie- ja vesirakennushallitus. tien rakenne. TVL:n ohjeet. Helsinki. Kansio B osa IV.



Tielaitos
Uudenmaan tiepiiri

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 34/1992 Tienvarsialueiden kasvittamisen ja hoidon kehittäminen luonnonmukaisempaan suuntaan. TIEL 3200088
- 35/1992 Päälystetyn tien kuntoennusteet. TIEL 3200089
- 36/1992 Päälystettyjen teiden pintakunnon luokittelu. TIEL 3200090
- 37/1992 Satamiin johtavien erikoiskuljetusreittien kehittäminen
- 38/1992 CMA:n ympäristövaikutuksia ja käyttökokemuksia; kirjallisuustutkimus. TIEL 3200092
- 39/1992 Henkilöauton verotuksen muuttamisen vaikutuksia liikenteeseen. TIEL 3200093
- 40/1992 Hirvieläinonnettomuudet yleisillä teillä 1991. TIEL 3201921-92
- 41/1992 Liikenteen ja muiden toimintojen turvallisuuden vertailu 1988-1990. TIEL 3200094
- 42/1992 Pääväylät kaupunkialueilla; tasoliittymät. TIEL 3200095
- 43/1992 Reittiohjaus Lahdentiellä, esiselvitys. TIEL 3200096
- 44/1992 Seurannan sisällyttäminen tiehankkeisiin -luonnonolot. TIEL 3200097
- 45/1992 Liikennevalojen kunnossapitotutkimus. TIEL 3200098
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 47/1992 Kestopäälysteteiden kunnon piilorakennemalli. TIEL 3200100
- 48/1992 Tiehankkeiden sosioekonomisten vaikutusten arviointi, arviointimenettelyn selvitys. TIEL 3200101
- 50/1992 Tiemerkintämassojen käyttökelpoisuus. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 51/1992 Roadside Restareas and Restarea Structures and Equipment. TIEL 3200041E
- 52/1992 Kuntien liikenneturvallisuus vuosina 1982-1990. TIEL 3200103
- 53/1992 Henkilöautojen omistus, ajoneuvosuoritteet ja käyttöalueet. TIEL 3200104
- 54/1992 Selvitys liikennevalojen toiminnasta vähäisen liikenteen aikana. TIEL 3200105
- 55/1992 Kiertoliittymän liikenteelliset vaikutukset; ennen-jälkeen -tutkimus Lammin maantieliittymässä. TIEL 3200106
- 56/1992 Kaupunkimuotoilun historia, nykyaikaisen tie- ja liikennesuunnittelun historiallinen tausta. TIEL 3200107
- 57/1992 Teiden suolauksen aiheuttamien ympäristövahinkojen korvaaminen. Kymen tiepiiri
- 58/1992 Teknologian siirto; Bauma 1992 -messut. TIEL 3200108
- 59/1992 Reunapaalujen vaikutus ajokäyttäytymiseen ja liikenneonnettomuuksiin. TIEL 3200109

ISBN 951-47-6629-6
ISSN 0788-3722
TIEL 3200110